

비선형 저수지 모형을 이용한 저수지의 저류효과 평가

Evaluation of Reservoir Storage Effect Using Non-linear Reservoir Model

유철상* / 전창현**

Yoo, Chulsang / Jun, Chang Hyun

Abstract

This study expressed the reservoir's storage-discharge relation as a non-linear reservoir model and theoretically quantified the reservoir storage effect. Among those non-linear functions like exponential function, logarithmic function and power function considered, the exponential function of the storage-discharge relation was found to be the most valid. The non-linear reservoir model proposed was applied to the Chungju Dam and the Soyang River Dam, whose storage effects during flood were estimated to be about 23 hours and 43 hours, respectively. This result indicates that the Choongju Dam, even though its size and total storage volume are similar to those of the Soyang River Dam, does not achieve enough storage effect as its basin size and the inflow amount are much larger.

Keywords : non-linear reservoir model, storage-discharge curve, storage coefficient

요 지

본 연구에서는 저수지의 저류량-유출량 관계를 비선형 저수지 모형으로 표현하고, 이를 근거로 저수지의 저류특성을 이론적으로 정량화하였다. 비선형 모형으로는 지수함수, 로그함수 및 멱함수 형태를 고려하였으며, 이 중 저류량-유출량 간의 관계를 지수함수로 표현한 경우가 가장 적절한 것으로 판단되었다. 제안된 모형은 충주댐 및 소양강 댐에 적용하였으며, 그 결과로 충주댐의 홍수기 저류효과는 약 23시간, 소양강댐의 홍수기 저류효과는 약 43시간 정도로 추정되었다. 이러한 결과는 비록 댐의 규모 및 총 저류용량은 비슷하지만 유역면적 및 유입량에 비해 댐의 규모가 상대적으로 작은 충주댐이 소양강 댐에 비해 충분한 저류효과를 거두지 못하고 있음을 의미한다.

핵심용어 : 비선형 저수지 모형, 저류량-유출량 관계곡선, 저류상수

1. 서 론

댐 저수지와 같은 대형 저수지의 주요 목적 중 하나는 홍수저감기능이다. 즉, 댐에 의해 만들어진 공간에 홍수를 저류하여 지체 방류함으로써 홍수저감효과를 얻는 것이다. 이를 댐 저수지의 저류효과로 표현할 수 있다. 이러한 저류효과는 저류용량(storage capacity)에 의존적이며, 저

수지의 용량은 저수지의 면적-표고곡선(area-elevation curve)을 작성하고 이를 적분함으로써 표고-용량곡선(elevation-capacity curve)의 형태로 얻을 수 있다. 그러나 확보된 저류용량이 모두 홍수저감을 목적으로 사용되는 것은 아니다. 소위 홍수조절용량이 이 목적으로 사용되는 공간에 해당하며 통상 상시만수위 위에 설정된다(이승현, 2002).

* 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 교수 (e-mail: envchul@korea.ac.kr)

Prof. School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

** 고려대학교 대학원 건축사회환경공학부 석사과정 (e-mail: luckys286@naver.com)

이상과 같은 저수지의 특성은 궁극적으로 저수지의 저류량-유출량 관계곡선으로 정량화된다. 예를 들어, 가장 간단한 경우로서, 일정 수위 이상에서 여수로로 통해 자유 방류되는 경우에는 저수지의 지형형태학적 특성 및 여수로의 특성을 이용하여 저류량-유출량 관계곡선을 유도할 수 있다. 즉, 어떤 수면표고까지의 저류량은 댐 지점에서의 지형도로부터 결정할 수 있고, 수위별 방류량의 규모는 위어 공식을 사용하여 작성할 수 있다. 이렇게 작성된 저수지의 저류량-유출량 관계곡선은 저수지 홍수추적에 사용되며, 이 곡선의 특성이 저수지 하류 유역에 대한 홍수추적 결과에 큰 영향을 미치게 된다.

저수지 홍수추적은 저수지를 통과하는 홍수파에 미치는 저수지의 홍수조절 효과를 평가하는 수단을 제공한다(한건연 등, 2005). 즉, 저수지 홍수추적의 결과로부터 저수지 홍수조절용량의 결정이라든지 댐 높이 및 댐 부속구조물의 수리설계를 위한 기준수문량이 결정된다. 댐의 여수로나 방수로에 설치되어 있는 수문 (gate)이 완전히 개방되어 있거나 일정개도로 열려 있을 경우, 저수지로부터의 유출량과 저수지 내 저류량은 수면표고에 따라 결정되므로 홍수추적이 비교적 간단하다. 이를 단순저수지 홍수추적 (simple reservoir flood routing)이라 한다. 그러나 대형 댐 저수지에서와 같이 댐 운영방법이 복잡한 경우, 저수지 홍수추적은 좀 더 복잡한 양상을 띠게 된다. 이는 대부분의 대규모 저수지들이 여수로나 방수로에 수문을 달아서 하류로의 유출량을 조절하고, 방류구조물의 수리특성과 운영조작 규칙, 저수지 유입량, 저류량, 댐 하류의 물 수요량에 따라 유출량의 크기를 결정하기 때문이다(윤용남, 2009). 그러나 이러한 경우에도 저수지의 특성은 저류량-유출량의 관계로 나타낼 수 있다.

저수지의 저류량-유출량 관계곡선은 저수지의 형태학적 특성 또는 저수지의 운영방법의 변화에 따라 달라지게 된다. 그러나 이렇게 달라질 수 있는 저수지의 특성이 저수지를 포함한 유역 전체 또는 그 하류 유역에 미치는 영향과 관련한 저수지 저류능력에 대한 정량적인 이해 및 평가는 저수지 상·하류의 홍수피해 규모와 직결되는 중요한 사항임에도 불구하고, 쉽게 정량화하기 어려운 것이 현실이다. 이와 관련하여 강우-유출 해석 시 저수지를 추가하여 모의 실험하는 정도가 유일한 대안이다(김재형과 윤용남, 1986; 권오익과 심명필, 1998; 서영제 등, 1999; 이아름 등, 2006; 한건연 등, 2008). Pulse 방법과 같이 현재 가용한 저수지 홍수추적 방법은 주로 선형저수지 모형을 적용하여 저류량-유출량 간의 관계를 정량화하기 때문에 실제 저류 특성을 직접 반영하지 못하는 한계를 지니게 된다(Crawford and Linsley, 1966; James, 1970; Holtan et al., 1975).

본 연구에서는 이상과 같은 문제점들에 착안하여 저수지의 저류량-유출량 관계를 비선형 저수지 모형으로 표현하고, 이를 근거로 저수지의 저류특성을 이론적으로 정량화하고자 한다. 본 연구에서는 몇 가지 비선형 저류방정식의 형태를 고려하였으며, 그 중 가장 타당한 것을 충주댐, 소양강댐 저수지에 적용하여 본 연구에서 고려한 댐 저수지의 홍수기 저류효과를 평가하였다.

2. 저수지 홍수추적의 이론적 배경

2.1 선형저수지 모형에 근거한 수문학적 홍수추적

수문학적 홍수추적이란 연속방정식과 저류방정식을 이용하여 홍수추적함을 의미한다. 이는 수리학적 홍수추적이 연속방정식과 운동량방정식에 기초하는 것과 비교된다. 따라서 수문학적 홍수추적을 위해서는 그 대상인 유역, 하도 또는 저수지의 특성을 반영하는 적절한 형태의 저류방정식이 제시되어야 한다. 가장 일반적으로 도입되는 것이 선형의 저류방정식으로서 저류량과 유출량간의 선형적인 관계를 가정하는 것이다. 유역추적의 경우에 Clark 단위도 모형 (Clark, 1945)이 그렇고, 하도추적의 경우에도 Muskingum 방법 (유철상과 김하영, 2010)이 그렇다.

선형의 저류방정식에 기초한 저류량과 유출량간의 관계를 선형저수지 모형이라고 부른다. 부연하면 선형저수지 모형은 기본적으로 저류량과 유출량간에 선형의 관계가 만족된다는 가정에 근거하고, 일반적으로 다음과 같은 저류방정식을 기초로 한다.

$$S(t) = KQ(t) \quad (1)$$

위 식에서, $S(t)$ 는 시간 t 에서의 저류량, $Q(t)$ 는 유출량을 나타내고, K 는 비례상수로서 저류상수라 부른다. 이러한 선형저수지 모형은 그 형태가 간단하여 다양한 해석에 매우 유리한 측면이 있다.

선형의 저류방정식을 연속방정식에 대입하면 다음과 같이 유출량 $Q(t)$ 에 대한 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$I(t) - Q(t) = \frac{dS(t)}{dt} = K \frac{dQ(t)}{dt} \quad (2)$$

위 식에서 $I(t)$ 는 유입량을 나타낸다. 만일 단위 (unit) 크기의 유입량이 순간적으로 저수지에 들어온다면, 위 미분방정식을 Dirac Delta 함수를 사용하여 변형시킬 수 있다. 즉,

$$Q(t) = \frac{1}{K} e^{-t/K} \quad (3)$$

위 결과식은 선형저수지에서의 순간 단위 유입량에 대

한 유출량을 나타내며, 선형시스템에서의 충격응답함수 (impulse response function)와 동일하다. 만일 어떤 유역을 선형저수지로 모의한다면 그 유역의 순간단위도 (instantaneous unit hydrograph: IUH)와도 같다. 위 충격응답함수 또는 순간단위도는 시간 $t=0$ 에서 최대값을 가지고 이후 지수적으로 감소하는 형태를 띠게 된다. 이 선형저수지 이론은 비록 자연유역의 실제 유출형태를 반영하지 못하는 한계가 있지만 홍수해석 시 해석상의 장점으로 인해 많이 거론되는 모형이다. 잘 알려진 바와 같이 선형저수지를 여러 개 연결하게 되면 그 충격응답함수의 모양이 많이 바뀌게 되는데 이를 Nash 모형 (1957)이라고 한다.

2.2 비선형저수지 이론에 근거한 수문학적 홍수추적

일반적으로 저수지 홍수추적의 경우에는 선형저수지 이론이 적용되지 않는다. 이는 저류량과 유출량간의 선형적인 관계가 성립하는 경우가 드물기 때문이다. 따라서 대상 저수지의 특성을 반영하여 유도한 다음과 같은 비선형의 관계를 홍수추적에 이용할 수 있다.

$$S(t) = f(Q(t)) \quad (4)$$

위와 같은 저류량과 유출량간의 관계는 특정함수의 형태로 주어질 수도 있고, 또는 그래프로 주어질 수도 있다. 일반적인 댐 저수지의 특성은 수심 (H)의 증가에 따른 저류량 (S)의 증가가 유출량 (O)의 증가보다 훨씬 크게 나타난다 (Fig. 1).

따라서 저류량을 횡축에 유출량을 종축에 넣고 그 관계를 그래프로 그린다면 그래프의 기울기는 점차 감소하는 형태를 보여주게 된다. 이는 대수 (log) 함수의 전형적인 형태이기도 하다. 댐 저수지의 형태학적 특성을 고려한다면 이러한 함수의 가정이 크게 무리 없음을 판단할 수 있다. 즉, 저류량과 유출량간의 관계를 다음과 같은 비선형

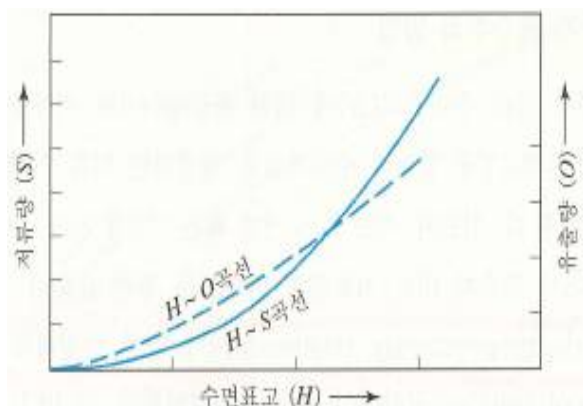


Fig. 1. Reservoir Stage-storage Curve and Stage-discharge Relation Curve (Yoon, 2009)

함수의 형태로 가정할 수 있다.

$$S(t) = \kappa \exp(\beta Q(t)) \quad (5)$$

위 비선형의 저류방정식을 연속방정식에 대입하면 다음과 같이 유출량 $Q(t)$ 에 대한 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} I(t) - Q(t) &= \frac{dS(t)}{dt} = \kappa \frac{d}{dt} (\exp(\beta Q(t))) \\ &= \kappa \frac{d}{dQ(t)} (\exp(\beta Q(t))) \frac{dQ(t)}{dt} \quad (6) \\ &= \beta \kappa \exp(Q(t)) \frac{dQ(t)}{dt} \end{aligned}$$

위 식에서 $I(t)$ 는 선형저수지의 해석에서와 동일하게 유입량을 나타낸다. 만일 단위 (unit) 크기의 유입량이 순간적으로 저수지에 들어온다면, 위 미분방정식을 다음과 같이 변형시킬 수 있다. 즉,

$$\beta \kappa \exp(Q(t)) \frac{dQ(t)}{dt} + Q(t) = \delta(t) \quad (7)$$

여기서, $\delta(t)$ 는 Dirac Delta 함수로서 $t=0$ 인 경우에만 정의되므로, $t > 0$ 인 경우에 대해 Eq. (7)을 다음과 같은 미분방정식으로 변형할 수 있다.

$$-\frac{1}{\beta \kappa} dt = \frac{\exp(Q(t))}{Q(t)} dQ(t) \quad (8)$$

위 식의 양변을 시간 0에서 t 까지 적분하면,

$$-\frac{1}{\beta \kappa} \int_0^t ds = \int_0^{Q(t)} \frac{\exp(Q(s))}{Q(s)} dQ(s) \quad (9)$$

위 Eq. (9) 중에 좌변의 해는 간단히 구할 수 있고, 우변의 해는 다음과 같이 치환적분법을 이용하여 구할 수 있다. 먼저, $\exp(Q(s)) = z$ 라 하면, $Q(s) = \ln z$ 이고, $d(Q(s)) = (1/z)dz$ 이므로 우변의 식을 정리한 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\int_0^{Q(t)} \frac{\exp(Q(s))}{Q(s)} dQ(s) \\ &= \int_1^{\exp(Q(t))} \frac{1}{\ln z} dz \quad (10) \\ &= \left[\ln(\ln z) + \ln z + \frac{\ln^2 z}{2 \cdot 2!} + \frac{\ln^3 z}{3 \cdot 3!} + \dots \right]_1^{\exp(Q(t))} \end{aligned}$$

위와 같은 해는 특히 $z = \exp(Q(t))$ 가 e 인 경우에 불연속이 되는 문제가 발생한다. 그러나 일반적으로 $Q(t)$ 는 1보다 큰 값을 갖게 되므로, $z = \exp(Q(t))$ 가 e 보다 크다고 가정함으로써 함수의 불연속 문제를 배제하고, 유도된 해의 특성을 파악하기로 한다.

먼저, 위 해의 첫 번째 항만을 고려한다면, 그 결과는 선형저수지 모델을 적용한 경우와 같아진다는 것을 알 수 있다. 즉,

$$Q_1(t) = e^{-t/\beta\kappa} \quad (11)$$

위 식에서 아래첨자 1은 첫 번째 항만을 고려한 결과라는 의미이며, 두 번째 항만을 고려하는 경우의 유출은 다음과 같다.

$$Q_2(t) = -\frac{1}{\beta\kappa}t \quad (12)$$

위 결과 식은 유출의 특성이 그 발생 초기에 집중되는 경향이 상당히 완화되는 경우로 이해할 수 있다. 또한 세 번째 항과 네 번째 항만을 고려하면 그 유출 특성은 다음과 같이 나타난다.

$$Q_3(t) = (2 \cdot 2!) \sqrt{-\frac{1}{\beta\kappa}t} \quad (13)$$

$$Q_4(t) = (3 \cdot 3!) \sqrt[3]{-\frac{1}{\beta\kappa}t} \quad (14)$$

위 두 경우는 반대로 유량이 시간이 증가함에 따라 급격히 감소하는 것을 막아주는 역할을 한다. 그러나 첫 번째 항만을 고려하는 경우를 제외하고 추가로 나머지 항들을 고려한 경우의 해는 유량이 음 또는 무리수로 나타나는 경우가 발생하여 물리적이지 않을 수 있다. 현실적으로 이런 경우는 극단적인 상황으로서 더 이상 유출이 발생하지 않는 것으로 해석할 수 있다.

마지막으로, 위 Eq. (10)의 모든 항들을 포함한 일반적인 경우를 살펴보면 그 결과 식은 다음과 같다.

$$\ln Q(t) + Q(t) + \frac{Q^2(t)}{2 \cdot 2!} + \frac{Q^3(t)}{3 \cdot 3!} + \dots = -\frac{1}{\beta\kappa}t \quad (15)$$

그러나 Eq. (15)의 모든 항을 고려한 이론적인 해는 사용하지 않다. 이론적으로 해결될 수 있는 관계는 Eq. (15)의 두 번째 항까지만을 고려한 경우로서, 소위 Wright ω 함수 $w(t)$ 를 도입하여 그 해를 구할 수 있다 (Corless and Jeffrey, 2002).

$$Q_{1+2}(t) = \frac{e^{(-\frac{1}{\beta\kappa}t)}}{e^{w(-\frac{1}{\beta\kappa}t)}} \quad (16)$$

참고로, $w(t) = W_{\kappa(t)}(e^t)$ 로서 $\ln(\exp(t)) = t + 2\pi i\kappa(t)$ 를 만족하는 $\kappa(t)$ 로부터 정의된다.

Eq. (15)로 나타난 유출특성은 해석적으로 쉽게 파악하기 어려우므로, 주어진 $\beta\kappa$ 를 이용하여 t 에 따라 $Q(t)$ 가 어떻게 행동하는지를 파악하는 것이 보다 용이한 방법이

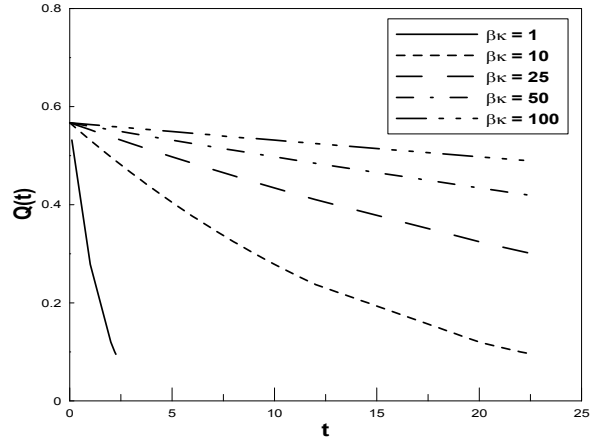


Fig. 2. $Q(t)-t$ Relation Curve with the Consideration of First and Second Terms

다. Fig. 2는 주어진 $\beta\kappa$ 에 대한 $Q_{1+2}(t)$ 의 거동을 보여주고 있다. Fig. 2로부터 $\beta\kappa$ 의 증가에 따라 $Q(t)$ 의 감소가 크게 지연되어 나타남을 파악할 수 있다.

추가로, 저류량과 유출량간의 관계를 지수함수의 형태가 아닌 로그함수 형태 또는 멱함수 형태로 고려해 볼 수 있다. Lambert (1969)는 저류량을 로그함수 형태의 유출량으로 표현하여 강우-유출 모델을 제시하였으며, Green (1979)의 경우에도 유사한 시도를 살펴볼 수 있다. 또한 멱함수 형태는 유역에서의 저류효과를 유출량의 함수로 표현한 Laurenson (1964)의 연구에서 찾아볼 수 있고, Potter (1975), Boyd and Buffil (1989) 등에서도 언급된 바 있다. 이 모형은 이후 국외의 많은 강우-유출 모형에 적용되어 저수지 홍수추적에 이용되었으며 (Mein et al., 1974; N.E.R.C., 1975; Kidd, 1976; Kidd and Lowing, 1979; Foroud and Broughton, 1981; Mandeville, 1983; Pirt, 1983; Eyre and Crees, 1984), 국내에서도 전민우 등 (2003)에 의해 검토된 바 있다. 이 두 모형의 기본 형태는 다음과 같다.

$$S(t) = \kappa \ln(Q(t)) \quad (17)$$

$$S(t) = \kappa Q^\beta(t) \quad (18)$$

위 식에서 κ 와 β 는 상수이다.

앞서, 저류량과 유출량간의 관계를 지수함수 형태로 가정하여 $Q(t)$ 를 산정한 방법과 동일하게, 위 Eqs. (17) and (18)의 경우에 해당하는 $Q(t)$ 를 유도해 보면 각각 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$Q(t) = \frac{\kappa}{t} \quad (19)$$

$$Q(t) = \left[-\left(\frac{\beta-1}{\beta}\right) \cdot \frac{1}{\kappa} \right]^{\frac{1}{\beta-1}} \cdot t^{\frac{1}{\beta-1}} \quad (20)$$

이상과 같이 유도된 결과를 살펴보면 두 경우 모두 선형저수지와 유사하게 시간에 대해 일정하게 감소하는 유량의 패턴을 보여줄 수 있기는 하다. 일면 그럴듯한 결과 이기는 하나, 보다 구체적으로 살펴보면, Eq. (17)의 경우에는 등식이 성립하기 위해 저류량보다 유출량이 커져야 하는 문제점이 있으며, Eq. (18)의 경우는 $0 < \beta < 1$ 인 조건에서만 성립된다는 한계를 갖는다. $\beta > 1$ 인 조건에서는 Eq. (20)로부터 유추해 볼 수 있듯이 물리적으로 타당하지 않은 결과를 유도하게 된다. 즉, 저류량과 유출량간의 관계를 Eqs. (17) and (18)과 같은 비선형함수의 형태로 나타내는 것은 가능하지만, 경우에 따라 저류량보다 유출량이 많아져야 한다는 비정상적인 상황이 초래될 수 있는 문제를 지니게 된다.

3. 저수지의 저류 및 지체 특성

3.1 선형저수지 이론에 근거한 경우

주어진 대상 저수지의 홍수추적에서 저류 및 지체 특성을 유도한다는 것은 결국 순간 유입에 대한 유출결과로부터 저류상수와 집중시간을 결정하는 것이다. 유출결과가 함수의 형태로 주어지는 경우, 이로부터 저류상수와 집중시간을 추정하는 방법은 어렵지 않다. 먼저 집중시간은 유효강우가 끝나는 시점으로부터 유출수문곡선의 하강부 첫 번째 변곡점 (inflection point)까지의 시간으로 정의된다. 따라서 수문곡선의 변곡점을 찾아내는 경우 정확한 집중시간의 결정이 가능하다. 저류상수는 변곡점에서의 평균유량을 변곡점의 기울기로 나눈 값으로 정의된다 (Sabol, 1988). 즉, 저류상수는 실측 수문곡선의 변곡점에서의 직접 유출량을 그 점에서 수문곡선에 그은 접선경사로 나누어줌으로써 구할 수 있다. 즉,

$$K^* = \frac{-Q_i}{(dQ/dt)_i} \quad (21)$$

Eq. (3)으로 주어진 선형저수지 모형의 유출 결과에 위

미분의 개념을 적용하면 $K^* = K$ 가 된다. 아울러 Eq. (3)에 대한 2차 미분을 이용하여 그 변곡점의 위치를 찾아낼 수 있다. 선형저수지 모형의 경우 그 값은 0이 되고, 따라서 지체효과는 발생하지 않는다.

3.2 비선형저수지 이론에 근거한 경우

비선형저수지 모형의 경우에도 선형저수지 모형에서와 동일한 개념을 적용하여 저수지 홍수추적의 지체 및 저류 특성을 유도할 수 있다. 먼저, Eq. (15)에 나타난 것과 같이, 저류량과 유출량간의 관계를 지수함수 형태의 비선형함수로 가정하는 경우는 유출 결과의 미분 특성을 이론적으로 유도하기 어렵다. 이론적인 해석이 가능한 경우는 Eq. (16)에서와 같이 Eq. (15)의 두 번째 항까지만을 고려한 경우이다. 즉,

$$\frac{dQ_{1+2}(t)}{dt} = \frac{g(t)-1}{\beta\kappa \cdot f(t) \cdot g(t)} - \frac{1}{\beta\kappa \cdot f(t)} \quad (22)$$

$$\frac{d^2Q_{1+2}(t)}{dt^2} = \frac{1}{(\beta\kappa)^2 \cdot f(t)} - \frac{2 \cdot [g(t)-1]}{(\beta\kappa)^2 \cdot f(t) \cdot g(t)} + \frac{[g(t)-1] \cdot [g(t)-2]}{(\beta\kappa)^2 \cdot f(t) \cdot (g(t))^2} + \frac{[g(t)-1]^2}{(\beta\kappa)^2 \cdot f(t) \cdot (g(t))^3} \quad (23)$$

위 식에서 아래첨자 1+2는 Eq. (15)의 첫 번째 및 두 번째 항까지만을 고려했다는 의미이다. 아울러

$$f(t) = e^{w(-\frac{1}{\beta\kappa}t) + \frac{1}{\beta\kappa}t}, \quad g(t) = 1 + w(-\frac{1}{\beta\kappa}t) \quad \text{이다. 이 경우}$$

에 대한 저수지의 지체특성은 Eq. (23)을 적용하여 살펴볼 수 있으며, 결과적으로 변곡점의 위치가 원점으로 나타나 선형저수지 모형에서와 동일하게 지체효과는 없는 것으로 파악되었다. 또한 저류효과는 Eq. (21)를 적용하여 이론적으로 유도할 수 있으며, 그 결과는 다음과 같다.

$$K^* = \frac{1}{\beta\kappa \cdot (1 + W_0(1))} \quad (24)$$

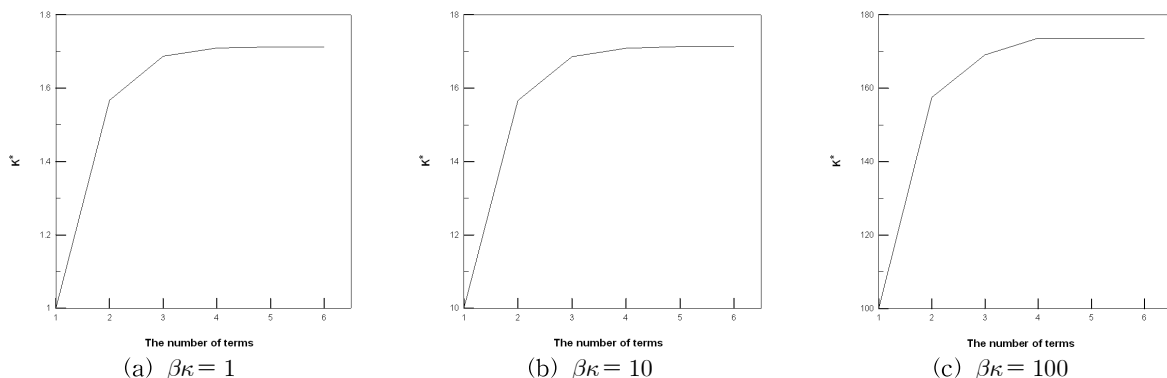


Fig. 3. The Change of Storage Coefficient Depending on the Number of Terms Considered in Eq. (15)

Eq. (15)의 세 번째 항 이상을 고려한 경우에 대한 이론적인 해석은 불가능하므로, 이후의 해석은 수치적으로 수행하였다. 즉, Eq. (15)의 항들을 순차적으로 추가해 가며, 변곡점의 위치를 확인하고 아울러 저류상수를 계산하였다. 결과적으로 변곡점의 위치는 고려한 모든 경우에 대해 원점으로 나타났고, 저류상수는 항들을 추가함에 따라 점차 일정한 값에 수렴함을 확인할 수 있었다. 그 결과는 다음 Fig. 3과 같다.

그림에서 살펴볼 수 있듯이 추정된 저류상수는 항이 추가될수록 일정한 값으로 수렴하는 형태를 보이고, 아울러 그 결과는 모형의 매개변수 β_K 에 관계없이 일정한 경향을 보인다. 즉, β_K 가 1일 때, K^* 는 1.71, β_K 가 10일 때, K^* 는 17.13로 산정되며, β_K 가 100인 경우에는 K^* 가 173.55의 값으로 수렴한다. 이는 K^* 가 β_K 와 비교하여 약 72% 증가된 값으로 수렴하는 형태임을 의미한다.

추가로 저류량과 유출량간의 관계를 Eq. (17)과 같이 로그함수 형태의 비선형함수로 가정한 경우 및 Eq. (18)와 같이 멱함수 형태의 비선형함수로 가정한 경우에 대해 저류효과를 Eq. (21)로 정리한 결과는 각각 다음과 같다.

$$K^* = t \quad (25)$$

$$K^* = (1 - \beta) \cdot t \quad (26)$$

그러나 위 결과는 변곡점의 위치가 원점으로 나타나 저류상수가 0으로 계산된다는 심각한 문제점을 갖는다. 즉, 로그함수나 멱함수 형태의 비선형 함수를 이용하여 저류량-유출량의 관계를 모사할 수는 있지만, 이 모형을 적용하여 물리적으로 타당한 저수지 저류효과의 이론적 해석 및 평가를 수행하기는 어려운 것이다.

4. 적용 사례

4.1 대상 지점 및 댐 운영 방식

본 연구에서는 실제 충주댐과 소양강댐의 댐 운영방식에서 제시된 저류량-유출량 관계를 분석하여 각각의 댐이 갖는 저류특성을 살펴보았다. 본 연구의 대상지역 중 충주댐 상류유역은 전 국토의 6.7%를 차지하는 남한강의 대표적인 댐 지점으로서 유역면적은 약 6,648 km², 유로연장은 375 km, 평균표고는 EL. 607 m로 전형적인 산지지역으로 분류된다 (Fig. 4a). 또한 대상 댐의 설계제원을 살펴보면 연 평균 유입량은 154.5 cms, 계획홍수위는 EL. 145 m, 상시만수위는 EL. 141 m, 총 저수용량은 2,750백만 m³, 홍수조절용량은 616백만 m³임을 알 수 있다 (한국수자원공사, 2009). 소양강댐 상류 유역의 경우, 11개의 소유역으로 구성되는 중규모의 유역으로 유역면적은 약 2,703 km², 평균표고는 EL. 650 m이며, 유역 면적의 대부분이 산림으로 구성되어 있는 대표적인 산악지역으로 분류된다 (Fig. 4b). 추가로 대상 댐의 설계제원을 살펴보면 연 평균 유입량은 55.5 cms, 계획홍수위는 EL. 198 m, 상시만수위는 EL. 193.5 m, 총 저수용량은 2,900백만 m³, 홍수조절용량은 500백만 m³임을 알 수 있다 (한국수자원공사, 2009).

본 연구의 분석대상인 충주댐과 소양강댐의 저류량-유출량 관계곡선은 댐운영 실무편람 (한국수자원공사, 2009)에 제시된 수위-저류량, 수위-유출량 관계곡선으로부터 구할 수 있다. 이 관계곡선을 또한 대상 댐의 여수로에 설치되어 있는 해당 수문에 적용 가능한 여수로 방류량 조건표와 저수지의 수면표고별 저류량 관계를 나타내는 수위-저수용량표로부터도 작성가능하다. 본 연구에서는 충주댐과 소양강댐에 대해 각각 23개, 13개의 수위에 해당하는 저류량과 유출량을 산정하고, 그 값들 간의 관계를 다음 Fig. 5와 같이 도시하였다.

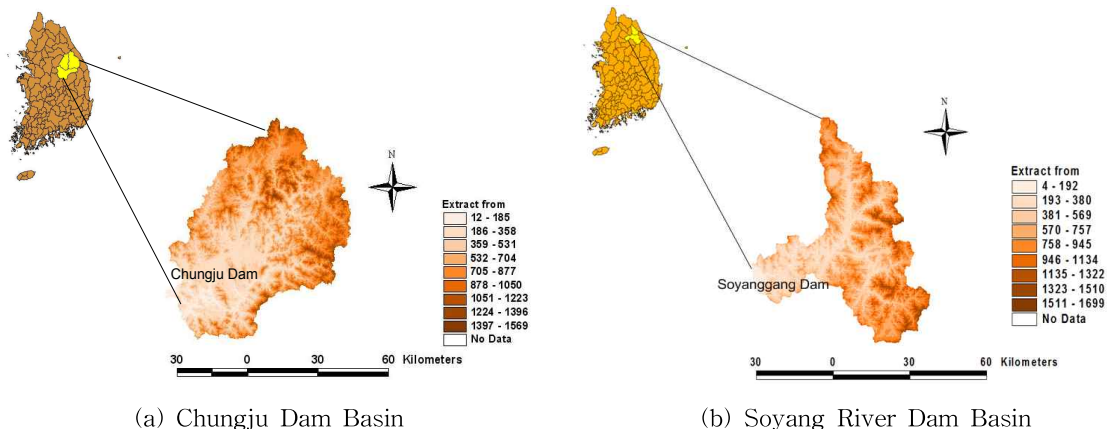


Fig. 4. The Topographic Map of the Study Basin

Fig. 5에서는 먼저, 댐 저수지와 같은 대형 저수지의 저류량이 유출량보다 현저히 크다는 점을 쉽게 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 적용하는 비선형 저수지 모형의 형태가 다른 비선형 모형의 경우에 비해 매우 현실적임을 판단할 수 있다. 참고로, Fig. 5에 나타난 홍수기 제한수위 (Restricted Water Level, RWL)는 홍수기 (6월 21일~9월 20일)에 홍수조절용량의 증대를 위하여 만수위 (High Water Level, HWL)를 내려서 운영하는 경우의 수위로서, 통상 3m 내·외인 것이 보통이다 (정중호와 윤용남, 2009). 본 연구에서 고려한 충주댐의 홍수기 제한수위는 138m로 해당 수위에서 1997.121백만 m^3 의 저수용량

과 7623.6 m^3/s 의 여수로 방류량을 갖게 된다. 또한 소양강댐의 홍수기 제한수위는 190.3m이며 해당 수위에서 2287.202백만 m^3 의 저수용량과 1195 m^3/s 의 여수로 방류량을 갖는다 (한국수자원공사, 2009).

4.2 적용 결과

본 연구에서는 해당 댐의 유출량-저류량의 관계를 전체 자료를 고려한 경우와 홍수기 제한수위 이상의 자료만을 고려한 경우로 구분하여 비선형 저수지 모형으로 표현하였다 (Fig. 6, Fig. 7, Table 1). 먼저 Figs. 6 (a) and 7 (a)는 전체자료에 대한 것으로, 사실 홍수조절과 직접적

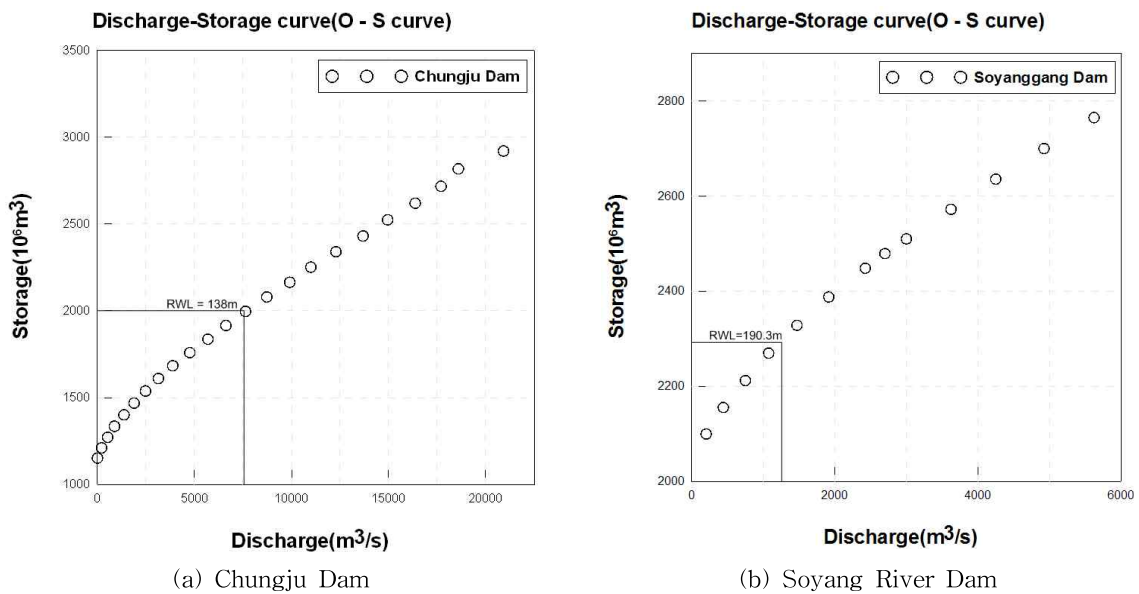


Fig. 5. The Storage–discharge Relation Curve of the Study Basin

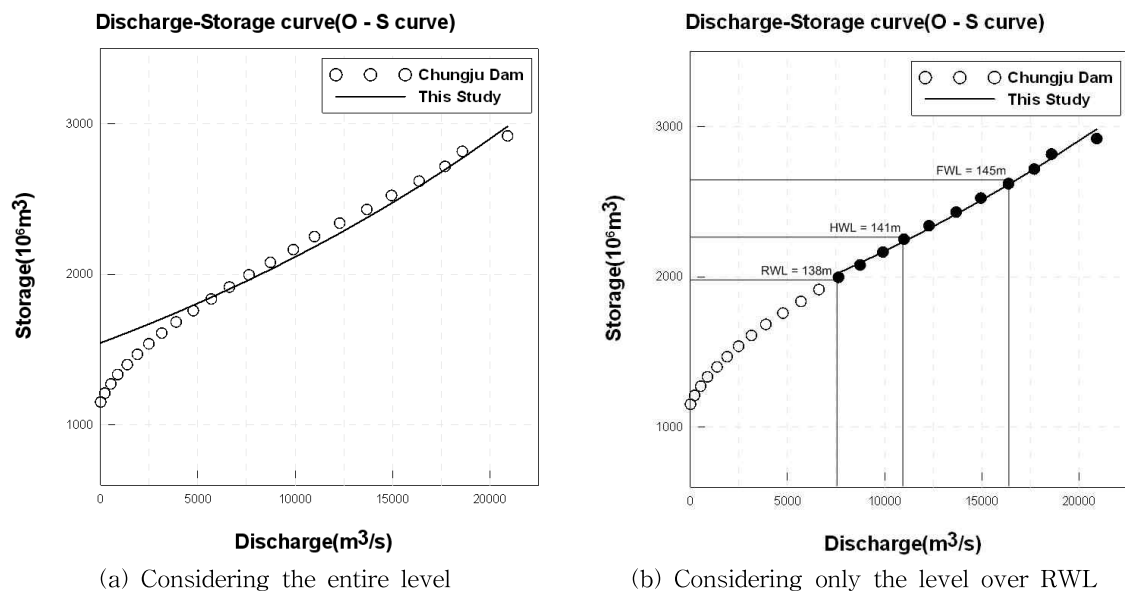


Fig. 6. The Storage–discharge Relation Curve of the Chungju Dam and Its Non-linear Reservoir Model Application

인 관련은 없다. 전체 자료를 고려하는 경우에는 유도된 비선형 저수지 모형이 특히, 저류량이 작은 부분에 대한 설명력이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 충주댐과 소양강댐 유역의 저류량-유출량 관계곡선이 저류부분과 홍수조절부분을 고려하는 각각의 곡선이 합쳐져 마치 변곡점이 있는 곡선의 형태로 표현되기 때문이다. 그러나 Figs. 6(b) and 7(b)에서와 같이 저수지의 홍수조절용량 부분만을 고려하여 살펴보면 본 연구에서 제시한 비선형 저수지 모형이 저류량-유출량의 관계를 매우 잘 설명할

수 있음을 확인할 수 있다. Table 1에서 확인할 수 있는 것처럼 유도된 저류량-유출량 곡선의 결정계수는 0.99에 이른다.

Eqs. (16) and (22)로부터 저류상수를 구하기 위해서는 비선형 저수지 모형의 매개변수인 κ 와 β 의 곱, $\beta\kappa$ 를 산정하는 것이 선행되어야 한다. 여기서 매개변수 κ 와 β 는 단순 최소자승법 (least squares method)으로 산정하였으며, 이는 Eq. (5)로 정의되는 비선형 저수지 모형과 실제 저류량-유출량 자료간의 관계로부터 결정될 수 있다. 이

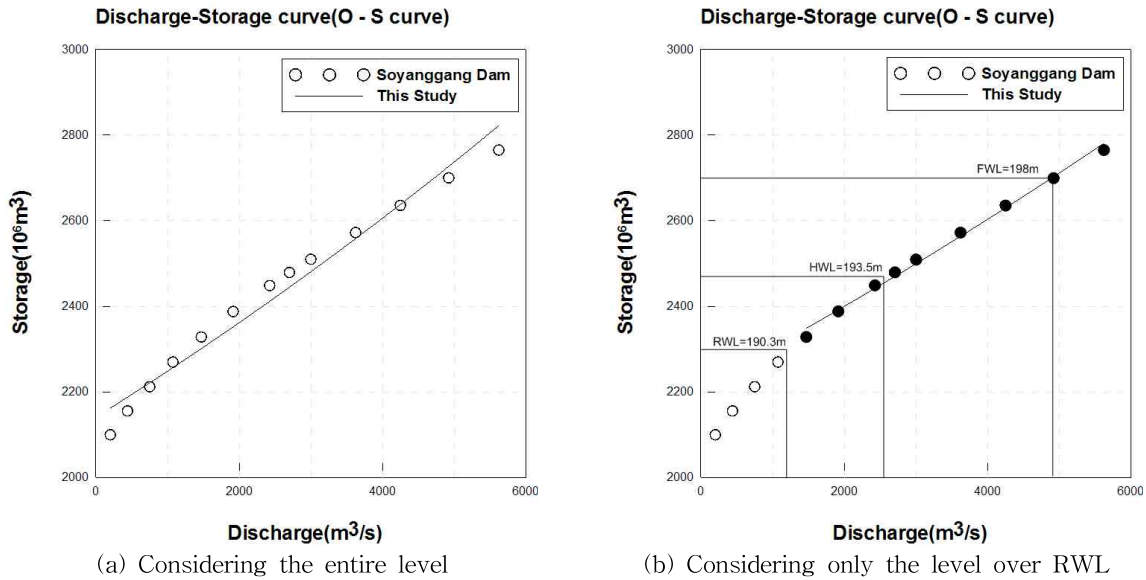


Fig. 7. The Storage–discharge Relation Curve of the Soyang River Dam and Its Non-linear Reservoir Model Application

Table 1. Parameters of the Non-linear Reservoir Model Applied

Study Basin	Parameters	Considering the entire level	Considering only the level over RWL
Chungju Dam	κ	374372.2	450944.7
	β	0.00004214	0.00002909
	R^2	0.94	0.99
Soyang River Dam	κ	2140882933	2212231081
	β	0.0000001364	0.0000001129
	R^2	0.97	0.99

Table 2. Estimates of the Storage Coefficient

Study Basin	Parameters	Considering the entire level	Considering only the level over RWL
Chungju Dam	$\beta\kappa$	15.78	13.12
	K^* (hour)	27.06	22.50
Soyang River Dam	$\beta\kappa$	29.20	24.98
	K^* (hour)	50.07	42.84

렇게 결정된 β_K 값에서 약 72%가 증가된 값이 바로 저류상수, K^* 로 결정된은 앞에서 살펴본 바와 같다. 따라서 Table 1로부터 산정한 비선형 함수의 매개변수들로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

Table 2에서 살펴볼 수 있는 것처럼 충주댐 저수지 전체를 고려하는 경우의 저류상수는 27.06 hour이며 홍수조절부분만을 고려하면 22.50 hour로 나타난다. 또한 소양강댐 저수지 전체를 고려하는 경우와 홍수조절부분만을 고려한 경우에 해당하는 저류상수는 각각 50.07 hour, 42.84 hour로 나타난다.

5. 결론

본 연구에서는 비선형 저수지 모형을 제안하고, 이를 이용하여 저수지의 저류특성을 이론적으로 정량화하였다. 제안된 모형은 충주댐, 소양강댐 저수지에 적용하여 홍수기 저류효과를 검토하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

먼저, 저수지의 저류량-유출량 관계를 비선형 저수지 모형을 도입하여 정량화하였다. 고려한 여러 비선형 함수 중 지수함수의 형태가 가장 적절한 모형임을 확인하였다. 저수지의 저류특성은 저류상수로 정량화할 수 있으며, 저류상수는 비선형 저수지 모형의 매개변수를 이용하여 쉽게 결정할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 비선형 저수지 모형을 충주댐과 소양강댐에 적용한 결과, 홍수기 저류효과는 약 23시간, 43시간 정도로 파악되었다. 이는 충주댐과 소양강댐이 대상 유역의 저류효과를 크게 하여 홍수의 규모를 크게 낮추고 있는 것을 의미한다. 추가로, 이러한 결과의 차이는 근본적으로 충주댐과 소양강댐의 상대적 규모차이에서 발생한다. 즉, 비록 두 댐의 규모 및 총 저수용량은 비슷하지만 충주댐 유역의 규모 및 유입량은 소양강댐에 비해 월등히 크다. 따라서 충주댐은 소양강댐에 비해 충분한 저류효과 없이 방류되는 특성을 갖는 것이다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것입니다(KRF-2008-313-D01083). 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

권오익, 심명필 (1998). “저수지 홍수변환법에 의한 홍수

시 저수지 운영.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제1호, pp. 105-113.

김재형, 윤용남 (1986). “소유역의 홍수유출계산을 위한 단일선형 저수지 모형의 적용.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제19권, 제1호, pp. 65-74.

서영제, 김진규, 박현주 (1999). “강우-유출에 대한 선형 저수지 모형의 매개변수 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제6호, pp. 711-720.

유철상, 김하영 (2010). “Muskingum 하도추적 모형의 수문학적 재해석: 선형하천모형과 선형 저수지 모형의 선형결합.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제12호, pp. 1051-1061.

윤용남 (2009). 수문학, 청문각.

이승현 (2002). 세트 컨트롤 알고리즘을 이용한 홍수기 저수지 운영방안. 석사학위논문, 서울대학교.

이아름, 이도훈, 이은태 (2006). “저수지 방류량을 고려한 강우-유출 모형의 매개변수 추정에 관한 연구.” **한국수자원학회학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1822-1829.

진민우, 조용수, 연구방 (2003). “감수곡선으로부터 저수지 모형의 매개변수 결정.” **한국수자원학회학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 34-37.

정종호, 윤용남 (2009). 수자원설계실무, 구미서관.

한건연, 최규현, 김원, 김동현 (2005). “한강수계에서의 댐의 영향을 고려한 홍수추적.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제9호, pp. 747-760.

한건연, 김극수, 조완희, 육종화 (2008). “홍수기 저수지의 최적연계운영.” **한국수자원학회학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1708-1712.

한국수자원공사 (2009). 댐운영 실무편람.

Boyd, M.J., and Bufill, M.C. (1989). “Determining runoff routing model parameters without rainfall data.” *Journal of Hydrology*, Vol. 108, pp. 281-294.

Clark, C.O. (1945). “Storage and the unit hydrograph.” *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 110, pp. 1419-1446.

Corless, R.M., and Jeffrey, D.J. (2002). “The wright ω function.” in *Artificial Intelligence, Automated Reasoning, and Symbolic Computation*, J. Calmet, B. Benhamou, O. Caprotti, L. Henocque, and V. Sorge, eds., Vol. 2385 of *Lecture Notes in Comput. Sci.*, Springer, Berlin, Germany, pp. 76-89.

Crawford, N.Y., and Linsley, R.H. (1966). *Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV*. Report 39, Dep. Civ. Eng., Stanford Univ., Stanford.

- Calif., Tech, pp. 210.
- Eyre, B.A., and Crees, M.A. (1984). "Real-time application of the isolated event rainfall-runoff model." *Journal of the Institution of Water Engineers and Scientists*, Vol. 38, No. 1, pp. 70-78.
- Foroud, N., and Broughton, R.S. (1981). "Flood hydrograph simulation model." *Journal of Hydrology*, Vol. 49, pp. 139-172.
- Green, C.S. (1979). *An improved subcatchment model for the river dee*. Report 58, Institute of Hydrology, Wallingford.
- Holtan, H.N., Stiltner, G.J., Henson, W.H. and Lopez, N.C. (1975). *USDAHL-74 revised model of watershed hydrology*. ARS Technical Bulletin No. 1518, U.S. Dep. of Agric., Washington, D.C.
- James, L.D. (1970). *An evaluation of relationships between stream flow pattern and watershed characteristics through the use of OPEST: a self-calibrating version of the Stanford Watershed model*. Report 36, Water Resour. Inst., Univ. Kentucky, Lexington, Ky.
- Kidd, C.H.R. (1976). *A non-linear urban runoff model*. Report 31, Institute of Hydrology, Wallingford.
- Kidd, C.H.R., and Lowing, M.J. (1979). *The Wallingford urban subcatchment model*. Report 82, Institute of Hydrology, Wallingford.
- Lambert, A.O. (1969). "A comprehensive rainfall/runoff model for an upland catchment area." *Journal of the Institution of Water Engineers*, Vol. 23, pp. 231-238.
- Laurenson, E.M. (1964). "A catchment storage model for runoff-routing." *Journal of Hydrology*, Vol. 2, pp. 141-163.
- Mandeville, A.N. (1983). *Augmented hydrograph hypothesis: Discussion of principles*. Report 58. Institute of Hydrology, Wallingford.
- Mein, R.G., Laurenson, E.M., and McMahon, T.A. (1974). "Simple non-linear model for flood estimation." *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 100, No. 11, pp. 1507-1518.
- Nash, J.E. (1957). "The form of the instantaneous unit hydrograph." *International Association of Hydrological Sciences Publication*, Vol. 45, No. 3, pp. 114-121.
- N.E.R.C. (National Environment Research Council) (1975). *Flood Studies Report*. Institute of Hydrology, Wallingford, Oxford.
- Pirt, J. (1983). *A simple model to simulate catchment response to rainfall*. Department of Geography Occasional Paper Number 7. Loughborough University, Loughborough.
- Porter, J.W. (1975). "A comparison of hydrologic and hydraulic catchment routing procedures." *Journal of Hydrology*, Vol. 24, pp. 333-349.
- Sabol, G.V. (1988). "Clark unit hydrograph and R-parameter estimation." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No. 1, pp. 103-111.

논문번호: 11-010	접수: 2011.01.20
수정일자: 2011.05.12/05.25	심사완료: 2011.05.25